



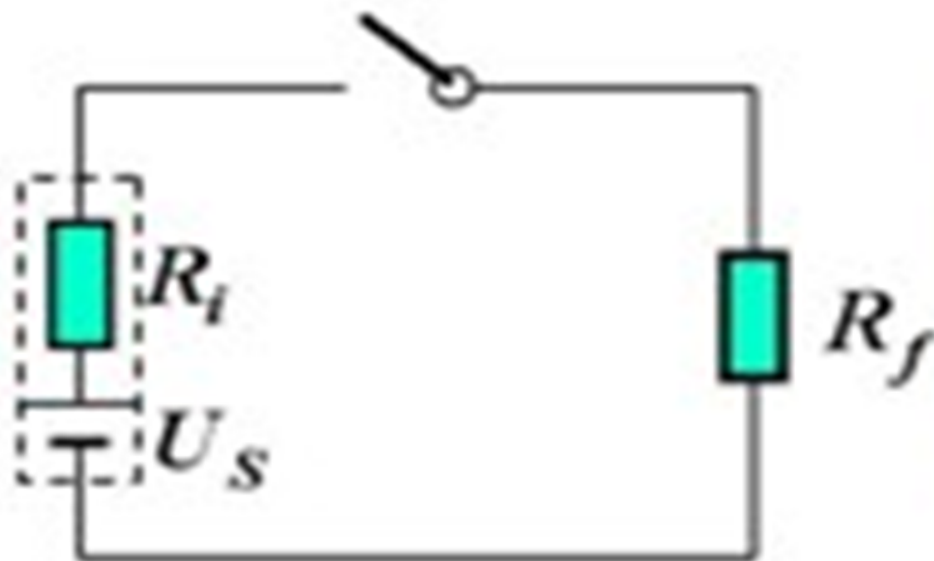
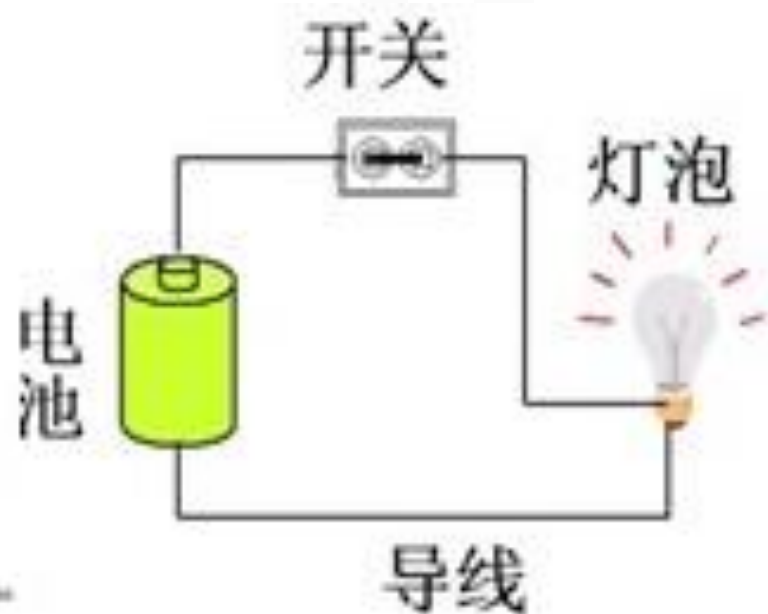
第1章 电系统及其电路抽象

本章介绍电路与电磁场理论的发展历程，此处只介绍**实际电路与电路模型**。

- ✧ **实际电路**：由实际元件、器件或部件构成的存有电流通路的整体，其作用是传输、分配电能或变换、处理电信号。
- ✧ **电路元件**：为便于分析与设计，将实际电路元件按其主要物理性质加以简化抽象，建立其物理模型，该物理模型称为电路元件（理想元件）。
- ✧ **电路模型**：由抽象化的电路元件组成的电路称为实际电路的电路模型，它在一定的精度范围内，近似地描述实际电路。



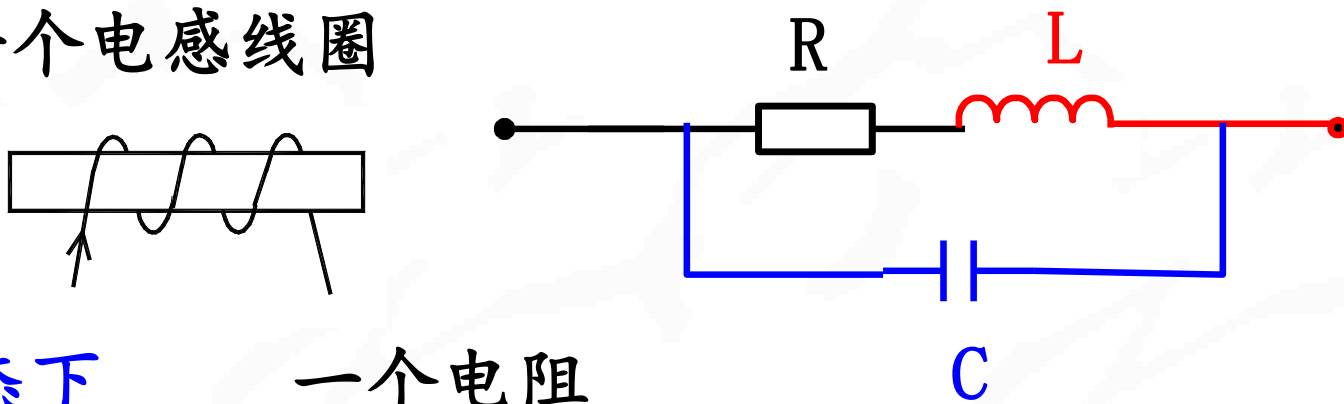
【示例】手电筒的电路模型



✧ 理想电路元件（元件模型）包括：电阻元件、电感元件、电容元件、独立电源元件、受控源元件等。

✧ 实际电路元件可以是多个理想电路元件的组合。

【示例】 一个电感线圈



✧ 直流状态下 一个电阻

✧ 交流低频情况下 一个电阻与一个电感串联

✧ 交流高频情况下 电阻与电感串联再与电容并联

✧ 超高频情况下 分布参数电路模型

集中参数电路（本教材各章）



➤ 电路计算基本物理量及单位

电流（安培） **1安培=1库/秒** **$1\text{A}=10^3\text{mA}=10^6\mu\text{A}$**

电压（伏特） **1伏特=1焦耳 \times 1库仑** **$1\text{V}=10^3\text{mV}$**

电功率（瓦特） **1瓦特=1安培 \times 1伏特** **$1\text{kW}=10^3\text{W}$**

电能（焦耳） **1焦耳=1瓦特 \times 秒**

电能（度） **1度=1千瓦小时(kWh)= $3.6\times 10^6\text{J}$**



第2章 电路元件、信号和基本定律

本章主要讨论：

- 电路中的基本物理量
- 电压电流的参考方向
- 电路中的信号
- 电路元件
- 基尔霍夫定律



2.1 电路中的基本物理量

➤ 电荷

- ✧ 电荷是带电的基本粒子，有正电荷和负电荷之分。
- ✧ 符号： q ；单位：C（库）。
- ✧ 电荷是电现象的基础：所有的电现象归根结底是电荷的分离和电荷运动；电荷的分离引起电势，电荷的运动产生电流。
- ✧ 电荷虽然是描述电现象的基础，但电压/电流是便于测量的基本电量。



➤ 电位（电势）、电压、电动势

- ✧ 电位（电势）：将单位正电荷从某点移动至参考点时电场力所做的功。电位是电路上某一点相对于参考地的电压。
- ✧ 电压：也称电压降、电位差，是电路上两点电势的差值。电压的方向为高电位指向低电位。
- ✧ 电动势：表征电源的物理量。电动势的方向是从负电极指向正电极，即从低电位指向高电位。电源电动势的方向与电源电压的方向刚好相反。
- ✧ 三者单位都是V（即：焦×库）；电位和电压常用 u （或 v ）来表示，电动势常用 E （或 ε ）来表示。



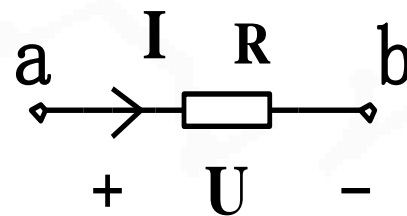
➤ 电流

- ✧ 电流是电流强度的简称。电流的大小（即电流强度）是指单位时间内通过导线某一截面的电荷量。
- ✧ 电流的方向为正电荷运动的方向。
- ✧ 符号： i ；单位：A（即：库/秒）。
- ✧ 电流是带电粒子（称为载流子）在电场作用下的定向运动所产生的。导体中的电流，载流子为自由电子（负电荷）；半导体导体中的电流，载流子为自由电子（负电荷）和空穴（正电荷）；真空管中的电流，载流子为正、负离子。

一、电压电流的参考方向

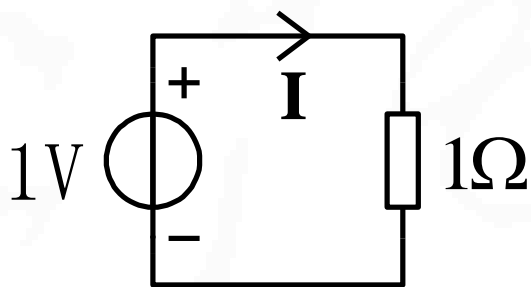
电路计算或描述电压电流大小时，必须先设定电压电流的参考方向，然后才能写出表达式进行计算。

✧ 电流的参考方向是任意规定的正电荷运动方向，图示为从a流向b。

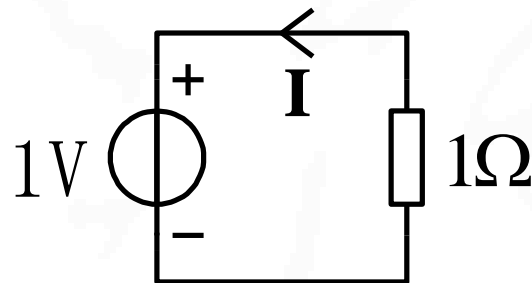


✧ 电流代数值是在指定参考方向下的数值。如果电流为负值，说明实际电流方向与参考方向相反。

【示例】

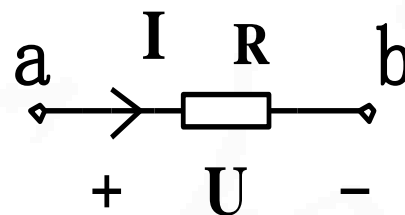
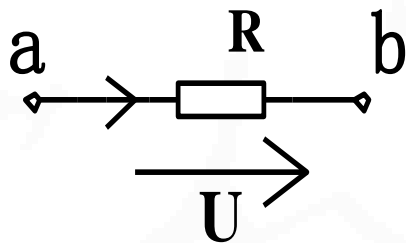


$$I=1A$$

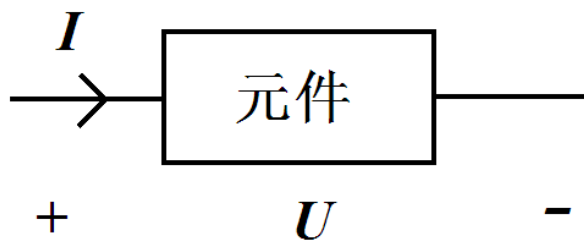


$$I=-1A$$

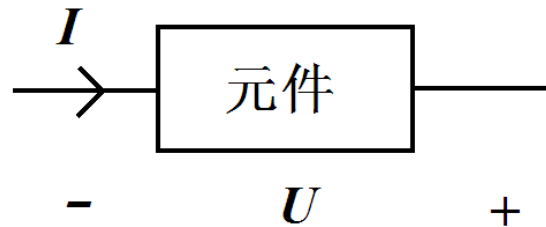
✧ 电压参考方向是指电压降落的方向，可用+、-符号表示，也可以用带箭头线表示。



✧ 当元件或支路的电压电流参考方向一致时，称作关联参考方向。电压电流参考方向不一致时，称作非关联参考方向。



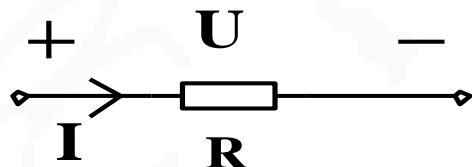
关联参考方向



非关联参考方向

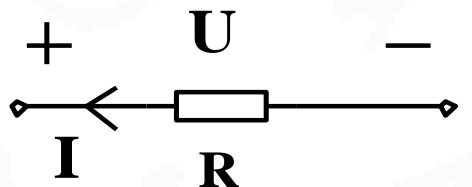
✧ 不同参考方向下，欧姆定律有不同的形式。

关联参考方向



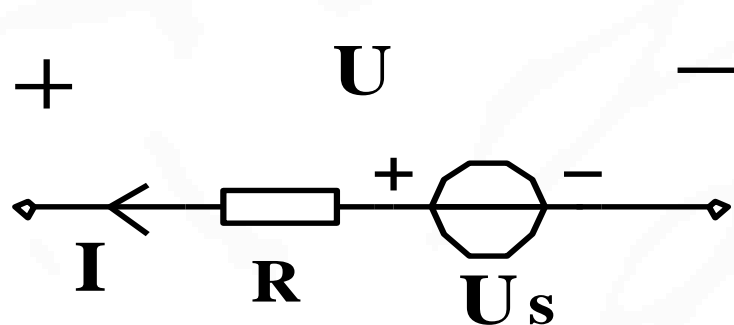
$$U = I \times R$$

非关联参考方向

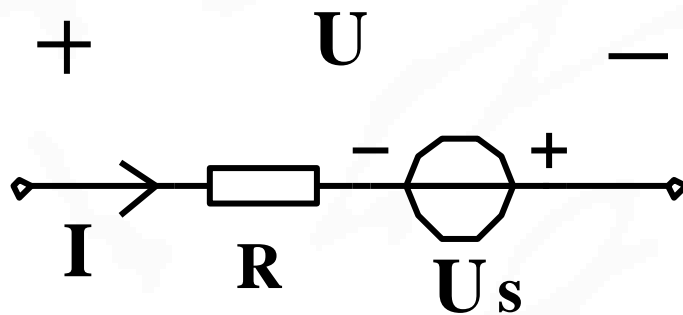


$$U = -I \times R$$

✧ 支路电压表达式的书写：注意支路与元件参考方向。



$$U = -I \times R + U_s$$



$$U = I \times R - U_s$$

注意：电路作业解题计算必须在电路图上标注电压电流参考方向！

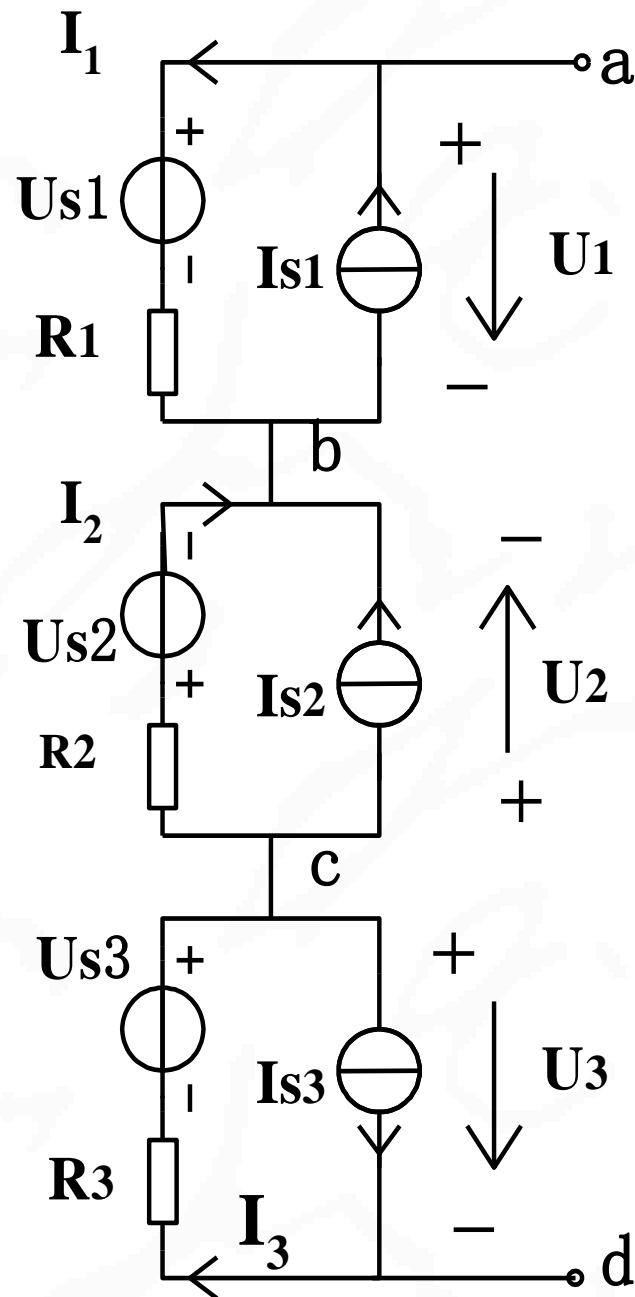
【例1】参考方向

电路及参考方向如图，已知
 $R_1=R_2=R_3=10\ \Omega$ ， $U_{S1}=U_{S2}=U_{S3}=12\text{ V}$ ， $I_{S1}=1\text{ A}$ ， $I_{S2}=2\text{ A}$ ， $I_{S3}=3\text{ A}$ ，
 a、d之间开路，求 U_{ad} 。

【解】

$$U_{ad}=U_1-U_2+U_3$$

$$\begin{aligned} U_1 &= U_{S1} + I_1 \times R_1 \\ &= U_{S1} + I_{S1} \times R_1 \\ &= 12 + 1 \times 10 = 22\text{ V} \end{aligned}$$





$$U_2 = I_2 \times R_2 + U_{S2}$$

$$= -I_{S2} \times R_2 + U_{S2}$$

$$= -2 \times 10 + 12 = -8 \text{ V}$$

$$U_3 = U_{S3} - I_3 \times R_3$$

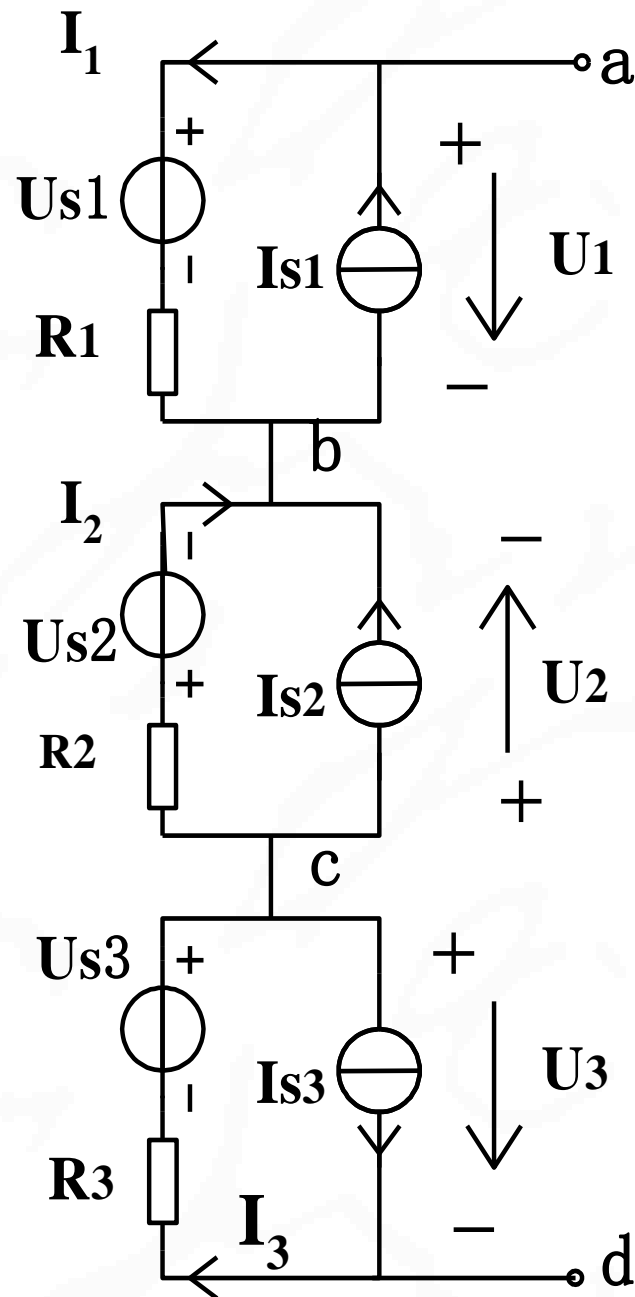
$$= U_{S3} - I_{S3} \times R_3$$

$$= 12 - 3 \times 10 = -18 \text{ V}$$

$$U_{ad} = U_1 - U_2 + U_3$$

$$= 22 - (-8) + (-18)$$

$$= 12 \text{ V}$$



二、功率与能量

✧ 直流电路中某器件的功率是电压 (V) 和电流 (A) 的乘积： $P=U \times I$ 。

✧ 功率的单位是瓦 (W)；能量符号：
W，能量单位：J (焦，瓦×秒)。

✧ 关联参考方向下：

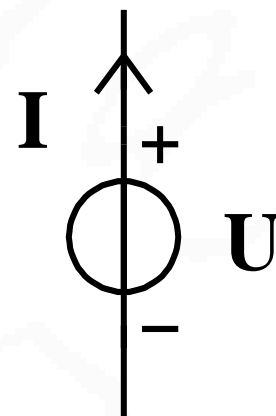
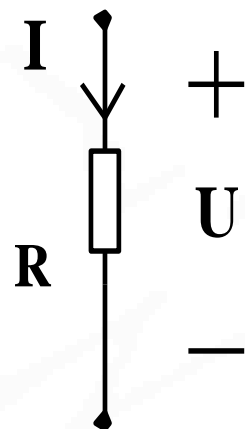
$P=U \times I > 0$ 表示该器件吸收功率

$P=U \times I < 0$ 表示该器件发出功率

✧ 非关联参考方向下：

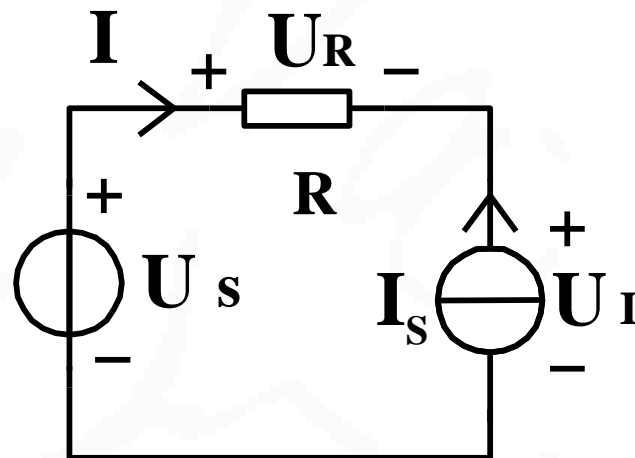
$P=U \times I > 0$ 表示该器件发出功率

$P=U \times I < 0$ 表示该器件吸收功率



【例2】功率计算

电路及参考方向如图，已知 $U_S=10\text{V}$ ， $I_S=2\text{A}$ ， $R=10\ \Omega$ ，求电压源、电流源和电阻的功率。



【解】 $I = -I_S = -2\text{ A}$

$$U_R = I \times R = -2 \times 10 = -20\text{ V}$$

$$U_I = -U_R + U_S = 20 + 10 = 30\text{ V}$$

电阻功率： $P_R = U_R \times I = -20 \times (-2) = 40\text{ W}$ （吸收功率）

电压源功率： $P_U = U_S \times I = 10 \times (-2) = -20\text{ W}$ （吸收功率）

电流源功率： $P_I = U_I \times I_S = 30 \times 2 = 60\text{ W}$ （发出功率）



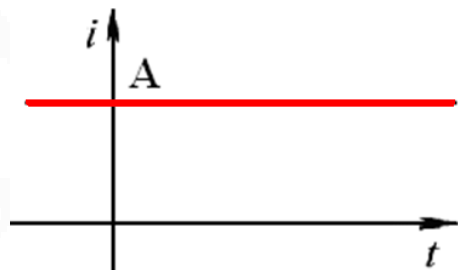
2.2 电路信号

- ✧ 电信号：随时间变化的电压、电流。
- ✧ 描述方式：时间函数表达式、时间函数图形（信号波形）。
- 电信号分类
 - ✧ 时间变化规律：确知信号(确定性信号)、随机信号(不规则信号)。
 - ✧ 时间重复性：周期信号、非周期信号。
 - ✧ 时间取值属性：模拟信号(连续信号)、离散信号。

➤ 典型信号：直流信号

✧ 直流信号表达式：

$$f(t) = A \quad -\infty < t < +\infty$$



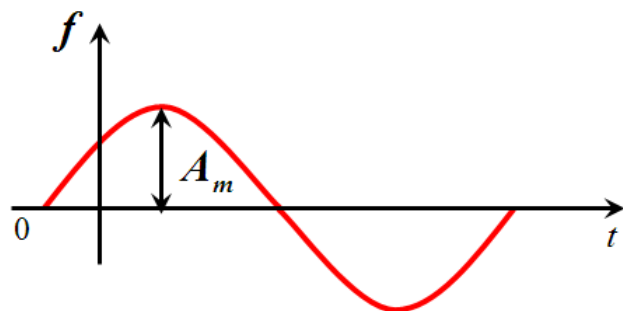
✧ 直流信号用大写大下标表示，如： U_S 、 I_O 。

✧ 当电路处理直流信号时，通常称为**直流电路**（第2、4章）。

➤ 典型信号：正弦交流信号

✧ 正弦信号表达式：

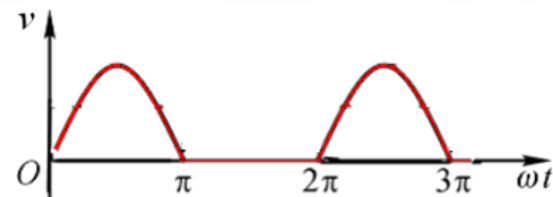
$$f(t) = A_m \sin(\omega t + \psi)$$



- ✧ 正弦信号用大写小下标表示，如： U_s 、 I_o 。或用相量来表示。
- ✧ 当电路处理正弦交流信号时，通常称为正弦交流电路，简称交流电路（第5、6、7章）。

➤ 典型信号：非正弦周期信号

✧ 非正弦周期信号示例：



✧ 非正弦周期信号特点：非正弦、周期性。

✧ 非正弦周期可分解为多个不同频率的正弦周期信号叠加。

✧ 当电路处理非正弦周期信号时，通常称为**非正弦交流电路**（第8章）。



2.5 基本电路器件及其电路模型

一、电阻器、电位器



碳膜电阻



金属膜电阻



贴片电阻



压敏电阻



湿敏电阻



光敏电阻

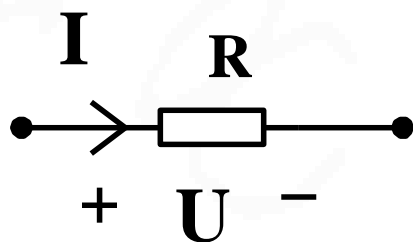


力敏电阻

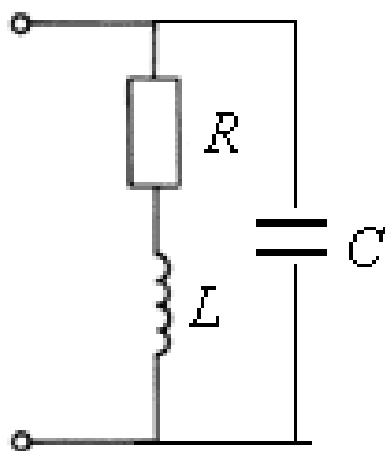


各类电位器

✧ 电阻器和电位器通常等效为一个电阻 R :



✧ 但在高频时则需要考虑频率特性，等效模型为：



高频时的等效模型



二、电容器



CBB电容 无感CBB电容



瓷片电容



云母电容



独石电容



钽电容



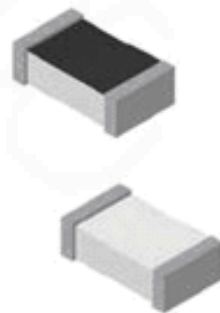
电解电容

✧ 电容器通常等效为一个电容 C 。

三、电感器



环形电感



贴片电感



插件电感



互感器

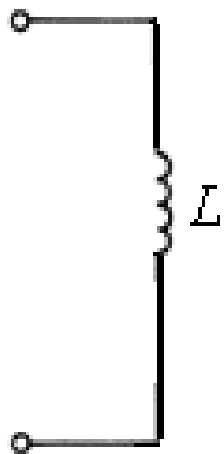


色码电感

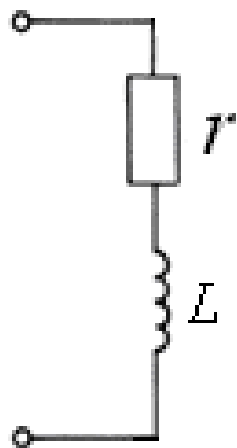
✧ 电感器通常等效为一个电感 L ;

有时还需考虑线圈电阻, 此时可等效为电感 L 与电阻 R 串联;

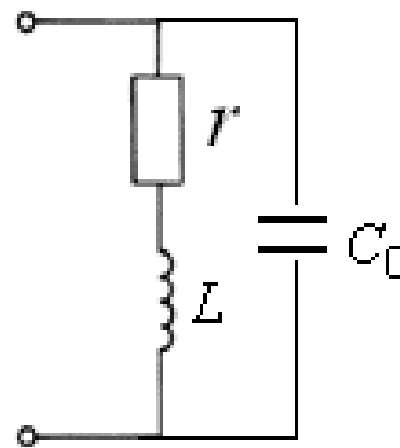
高频时还需考虑线圈的匝间电容和层间分布电容。



简单等效模型



低频电感模型



高频电感模型



四、电源



干电池



直流稳压电源



发电机组



太阳能电池



信号源

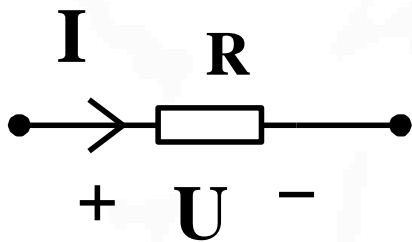
✧ 各类电源通常等效为一个独立电源（理想电压源或理想电流源）。

2.3 电路元件及其特性

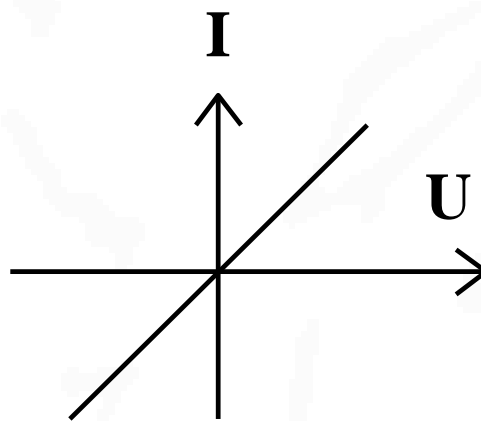
一、电阻元件

✧ 电阻：端电压与电流有确定函数关系，体现电能转化为其它形式能量的二端器件。实际器件如灯泡、电热丝、电阻器等均可表示为电阻元件。用字母 R 来表示，单位为欧姆 (Ω)。

$$U = f(I)$$



表示符号



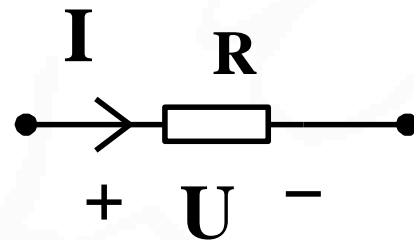
伏安特性



✧ 线性电阻的电压电流特性符合欧姆定律：

$$U = R \times I$$

✧ 电阻： $R = \frac{U}{I}$ 电导： $G = \frac{I}{U}$



✧ 电阻元件消耗的功率：

$$P = U \times I = I^2 \times R = \frac{U^2}{R}$$

✧ 电阻元件消耗的能量：

$$W = \int_0^t p dt = P \times t = I^2 R t$$

二、电容元件

✧ 电容元件是体现电场能量的二端元件。用字母 C 来表示，单位为法拉 (F)。

✧ 电容上储存的电荷 q 与端电压 u 之间关系

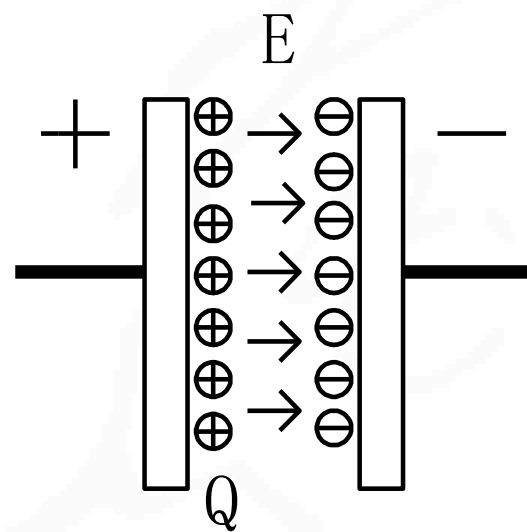
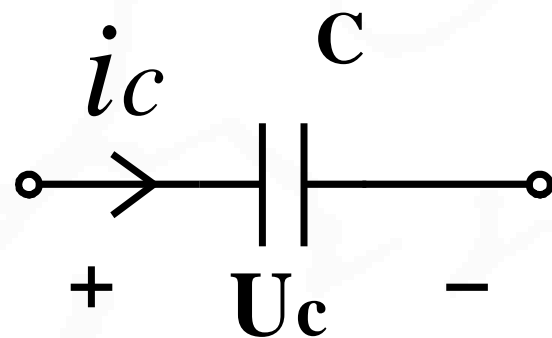
$$q = Cu_C$$

✧ 当电压和电流方向一致时，

有

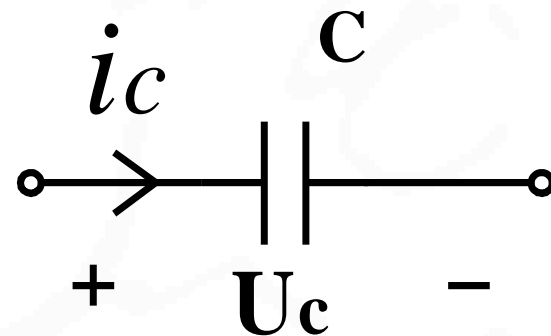
$$i_C = \frac{dq}{dt} = C \frac{du_C}{dt}$$

电容电压与电流具有动态关系
(电容是动态元件)。



✧ 电容电压具有“记忆”功能（电容是记忆元件）。

$$u_C(t) = u_C(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i_C dt$$



✧ 电容是储能元件。

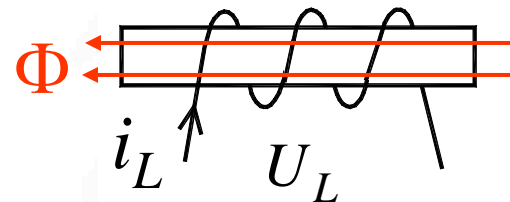
$$W = \int_{t_0}^t u \cdot i d\xi = \int_{t_0}^t u \cdot C \frac{du}{d\xi} d\xi = \frac{1}{2} [Cu(t)^2 - Cu(t_0)^2]$$

$$W(t) = \frac{1}{2} Cu(t)^2 = \frac{1}{2} q(t) \cdot u(t) = \frac{1}{2} \frac{q(t)^2}{C}$$

✧ 电容有“隔直流、通高频”的功能。

三、电感元件

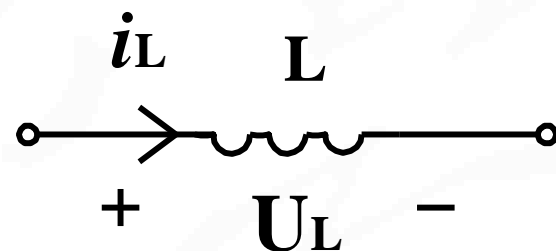
✧ 电感元件是体现磁场能量的二端元件。用字母 L 来表示，单位为亨利 (H)。



磁链 $\psi = N\phi$

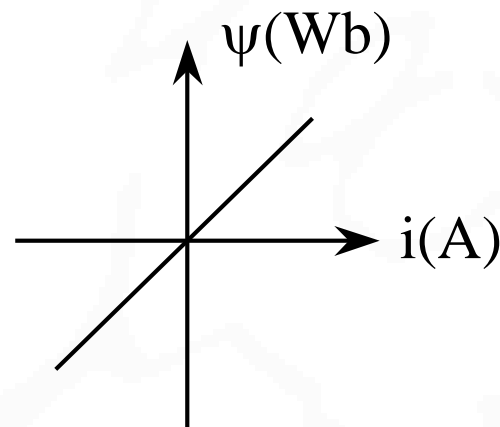
✧ 电感交链的磁通链 Ψ 与电流 i_L 之间有

$$\Psi = L i_L$$



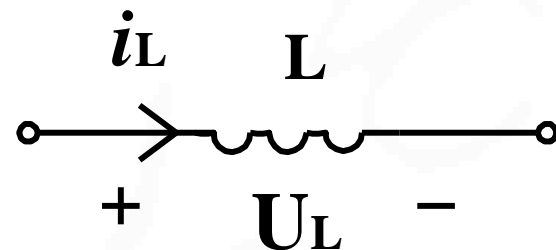
✧ 当电压和电流方向一致时，有

$$u_L = \frac{d\psi}{dt} = L \frac{di_L}{dt}$$



✧ 电感电流具有“记忆”功能（电感也是记忆元件）。

$$i_L(t) = i_L(0) + \frac{1}{L} \int_0^t u_L dt$$



✧ 电感也是储能元件。

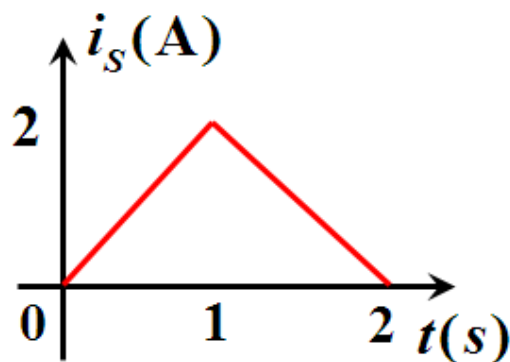
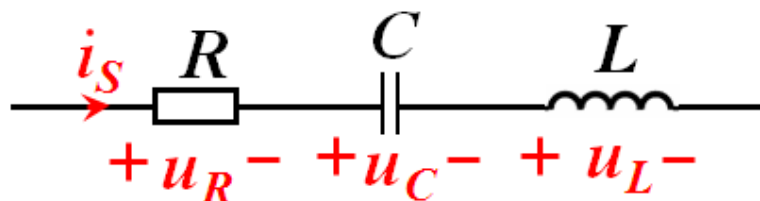
$$W = \int_{t_0}^t u(\xi) i(\xi) d\xi = \int_{t_0}^t L \frac{di}{d\xi} \cdot i \cdot d\xi = \frac{1}{2} [Li(t)^2 - Li(t_0)^2]$$

$$W(t) = \frac{1}{2} Li(t)^2 = \frac{1}{2} \psi(t) \cdot i(t) = \frac{1}{2} \frac{\psi(t)^2}{L}$$

✧ 电感有“通直流、阻高频”的功能。

【例1】

图示电路，已知 $R = 10\Omega$ ， $L = 10\text{mH}$ ， $C = 0.1\text{F}$ ，电容初始电压为0。求 $t > 0$ 后的电阻、电容、电感电压。



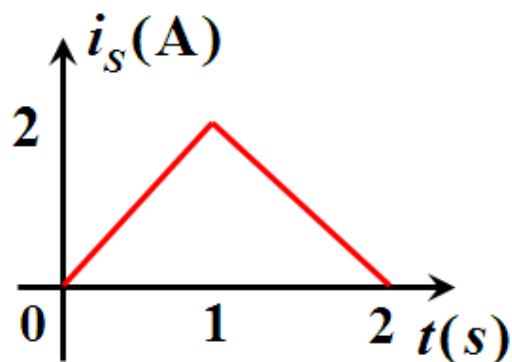
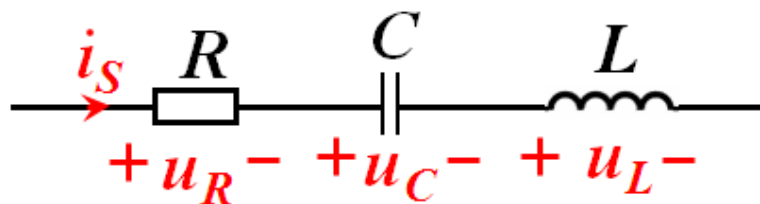
【解】 当 $0 \leq t < 1$ s时：

$$i_s(t) = 2t \text{ A}$$

$$u_R(t) = i \cdot R = 20t \text{ V}$$

$$u_C(t) = u_C(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt = 10t^2 \text{ V}$$

$$u_L(t) = L \frac{di(t)}{dt} = 0.02 \text{ V}$$



当 $1 \leq t < 2$ s 时:

$$i_s(t) = -2(t - 2) \text{ A}$$

$$u_R(t) = i \cdot R = -20(t - 2) \text{ V}$$

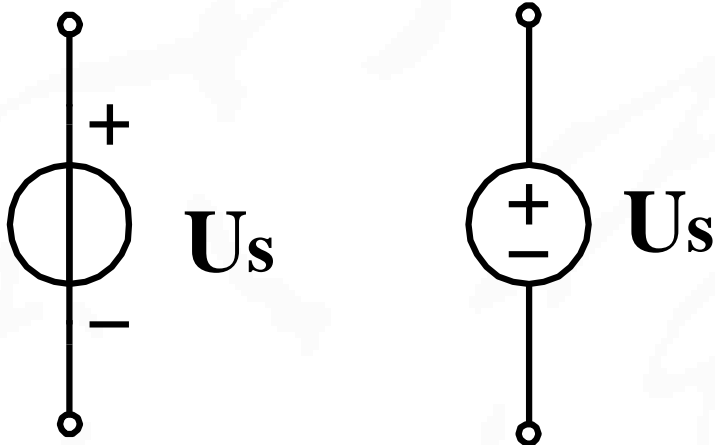
$$u_C(t) = u_C(1) + \frac{1}{C} \int_1^t i(t) dt = -10t^2 + 40t - 20 \text{ V}$$

$$u_L(t) = L \frac{di(t)}{dt} = -0.02 \text{ V}$$

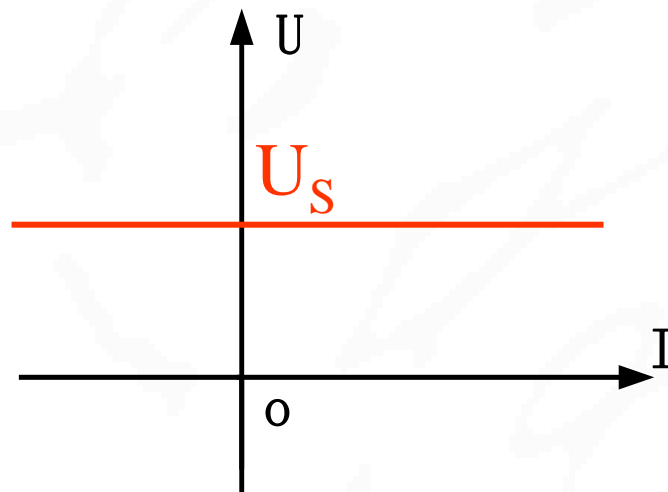
四、独立电源

1、理想电压源

✧ 独立电压源提供一个恒定或随时间按一定规律变化的电压，与流过电压源的电流无关。

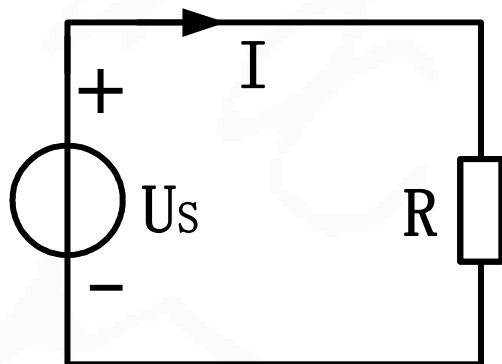


表示符号



伏安特性

✧ 理想电压源的电流由外界负载（外电路）确定。



$$I = U_s / R$$

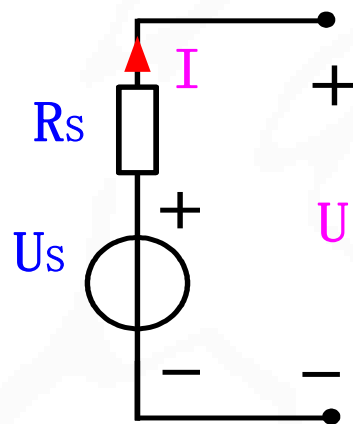
✧ 非零电压源不能直接短路，两个不等值的电压源不能并联。

✧ 当电压源数值 $U_s = 0$ 时，相当于短路（导线短接）。

✧ 实际电压源可用理想电压源与电阻串联来表示。

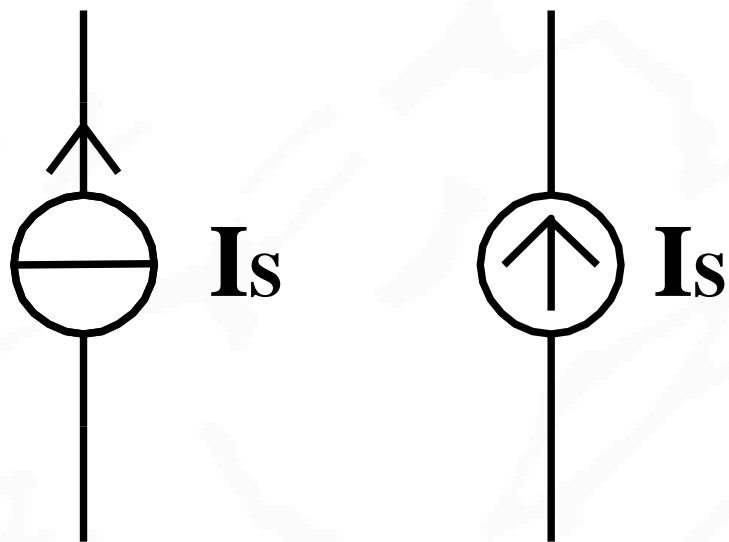
理想电压源的内电阻为0

实际电压源的内电阻不为0

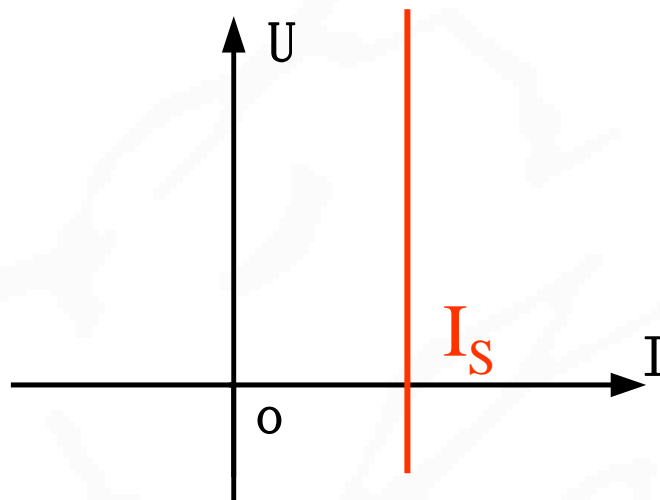


2、理想电流源

✧ 独立电流源端部流出一个恒定或随时间按一定规律变化的电流，与电流源端部电压无关。

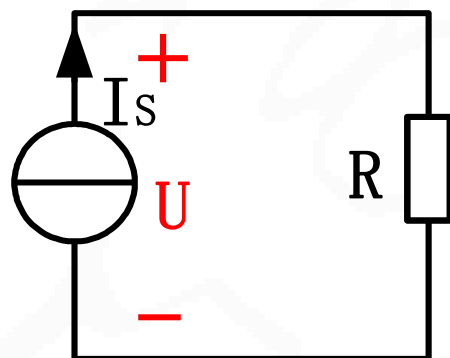


表示符号



伏安特性

✧ 理想电流源两端的电压由外界负载确定。



$$U = RI_S$$

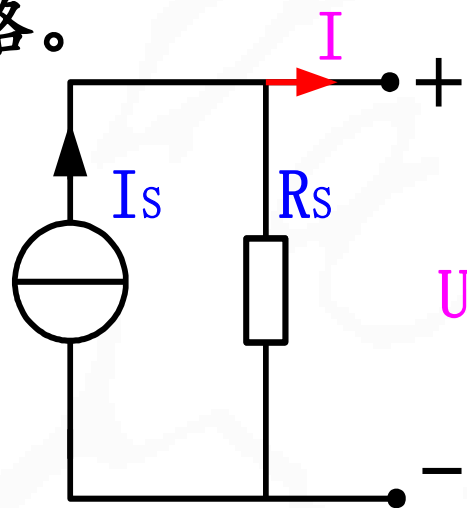
✧ 非零电流源不能开路，两个不等值的电流源不能串联。

✧ 当电流源数值 $I_S = 0$ 时，相当于开路。

✧ 实际电流源可用理想电流源与电阻并联来表示。

理想电流源的内电阻为无穷大

实际电流源的内电阻不为无穷大





【示例】 已知电压源和电阻数值，求各电流大小。

【解】 $I_1 = U_{S1} / R_1$

$$I_2 = U_{S2} / R_2$$

$$I_3 = (U_{S1} + U_{S2}) / R_3$$

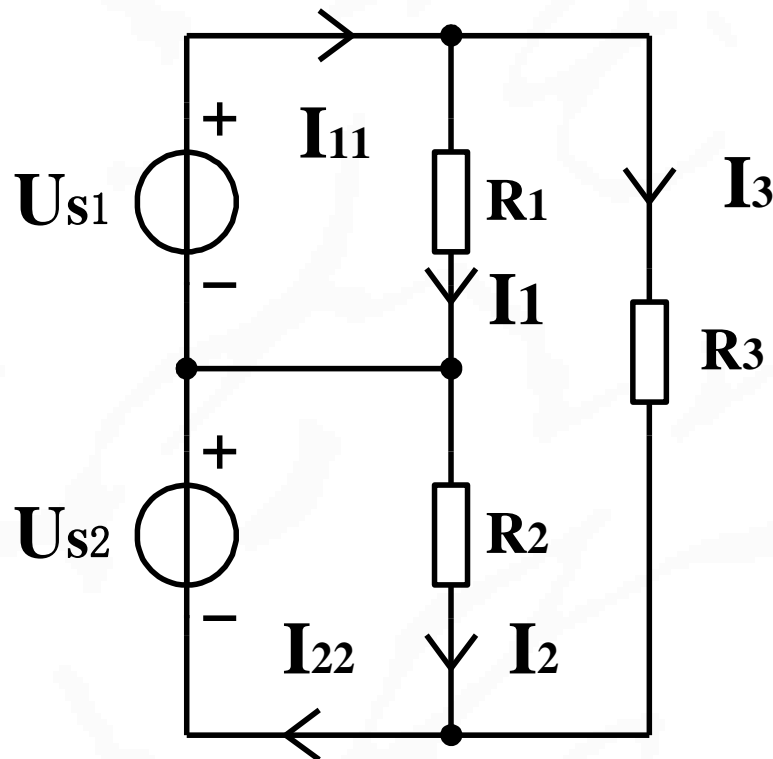
$$I_{11} = I_1 + I_3$$

$$I_{22} = I_2 + I_3$$

当 $U_{S2} = 0 \text{ V}$ 时，

$$I_2 = 0$$

$$I_{22} = I_3$$



五、受控电源

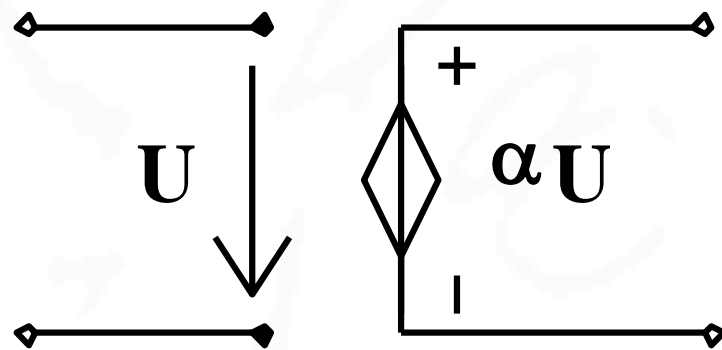
- ✧ 受控电源是一些实际电路器件的理想化模型，它们的输出电压和电流受到电路中其它部分电压或电流的控制，故又称非独立电源。
- ✧ 受控电源分为受控电压源和受控电流源，它们为四端元件。

➤ 受控源类型

✧ 电压控制电压源 (VCVS)

Voltage Control Voltage Source

控制系数为转移电压比

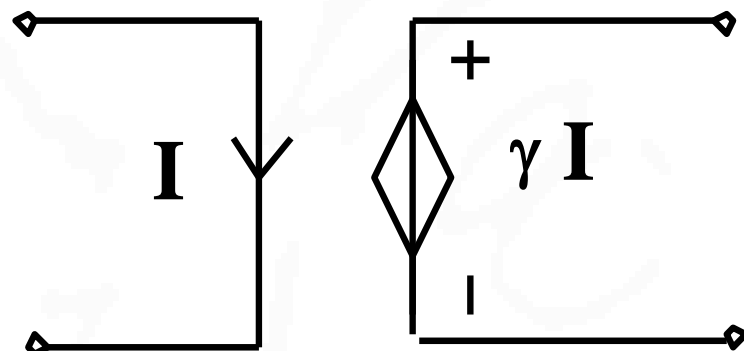




✧ 电流控制电压源 (CCVS)

Current Control Voltage Source

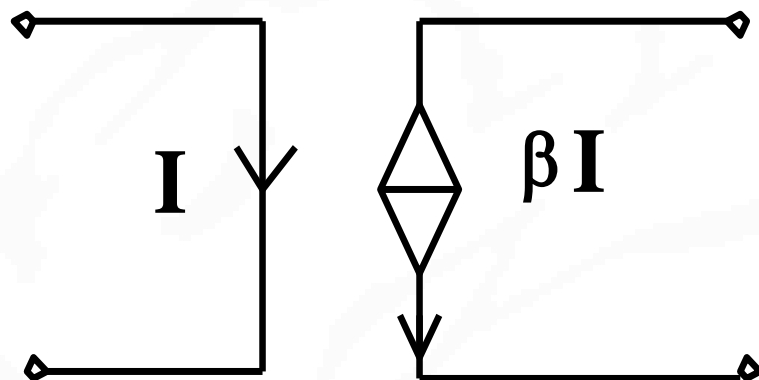
控制系数为转移电阻



✧ 电流控制电流源 (CCCS)

Current Control Current Source

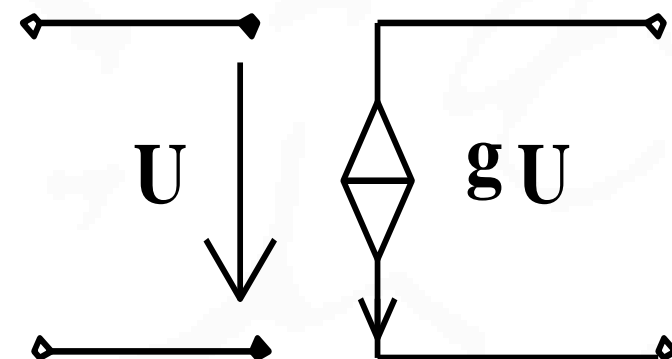
控制系数为转移电流比



✧ 电压控制电流源 (VCCS)

Voltage Control Current Source

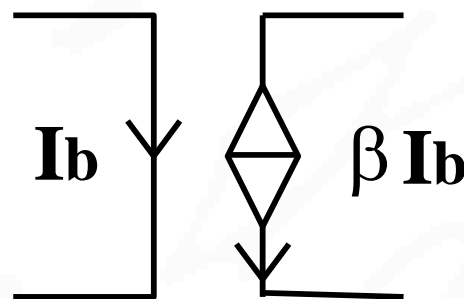
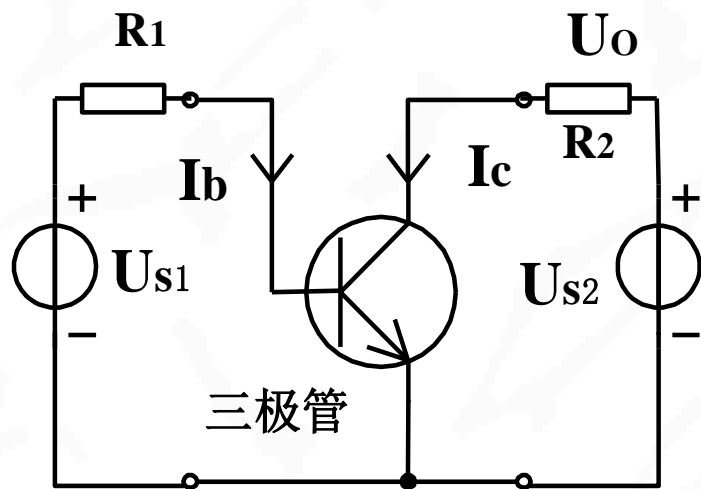
控制系数为转移电导





【示例】三极管放大时的电路模型

三极管在放大区工作时，根据其物理原理可知其集电极电流 I_C 受基极电流 I_B 控制。因此，可以将三极管元件等效为一个受控源模型。



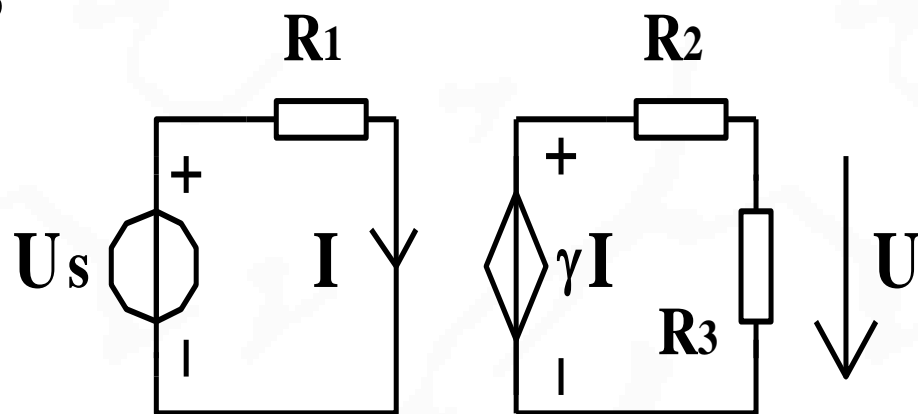
$I_c = \beta I_b$ β 为电流放大系数

CCCS

三极管元件

【例2】受控电压源电路

图示电路，已知 $U_S=10\text{V}$, $R_1=R_2=R_3=10\Omega$, $\gamma=10$, 求 R_3 上电压为多少？



【解】

控制变量
$$I = \frac{U_S}{R_1} = \frac{10}{10} = 1\text{A}$$

电流控制电压源电压 $\gamma I = 10 \times 1 = 10\text{V}$

R_3 上电压
$$U = \frac{\gamma I}{R_2 + R_3} \times R_3 = 5\text{V}$$

【例3】受控电流源电路

已知 $U_s=10\text{V}$, $R=10\Omega$, $\gamma=2$ 、 0 、 -2 时, 求 I_1 为多少?

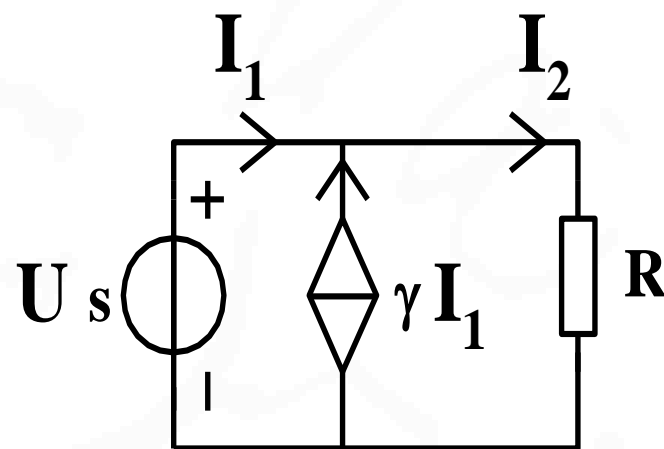
【解】
$$I_2 = \frac{U_s}{R} = \frac{10}{10} = 1\text{A}$$

$$I_1 + \gamma I_1 = I_2$$

当 $\gamma=2$ 时,
$$I_1 = \frac{I_2}{1+\gamma} = \frac{1}{1+2} = \frac{1}{3}\text{A}$$

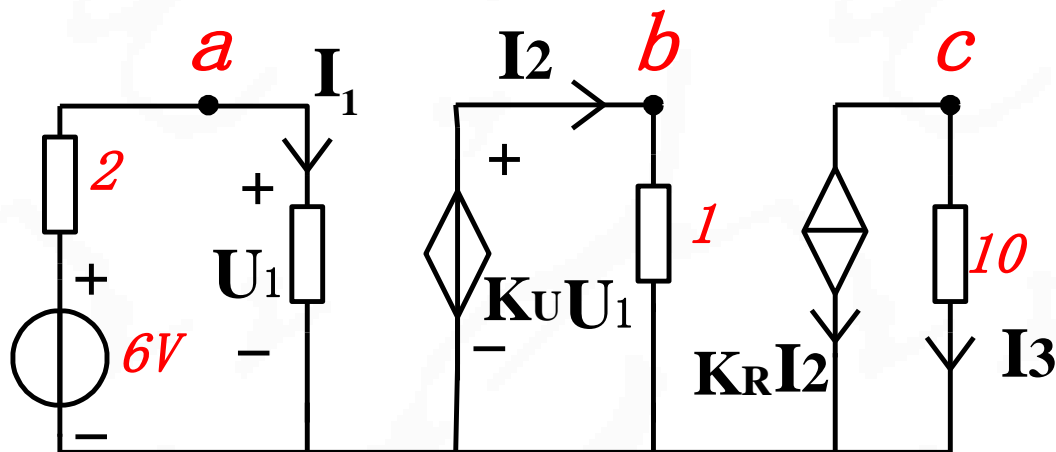
当 $\gamma=0$ 时,
$$I_1 = \frac{I_2}{1+\gamma} = \frac{1}{1+0} = 1\text{A}$$

当 $\gamma=-2$ 时,
$$I_1 = \frac{I_2}{1+\gamma} = \frac{1}{1-2} = -1\text{A}$$



【例4】

电路如图，已知 $I_1=2\text{A}$ ， $K_U=4$ ， $K_R=0.5$ ，求 I_3 和电压 U_{ab} 、 U_{ac} 。



$$\text{【解】 } U_1 = 6 - 2 \times I_1 = 2\text{V} \qquad I_2 = \frac{K_U U_1}{1} = 4 \times 2 = 8\text{A}$$

$$I_3 = -K_R I_2 = -0.5 \times 8 = -4\text{A}$$

$$U_{ab} = U_1 - K_U U_1 = 2 - 4 \times 2 = -6\text{V}$$

$$U_{ac} = U_1 - 10 \times I_3 = 2 - 10 \times (-4) = 42\text{V}$$

六、多端网络与双口网络

➤ 多端网络

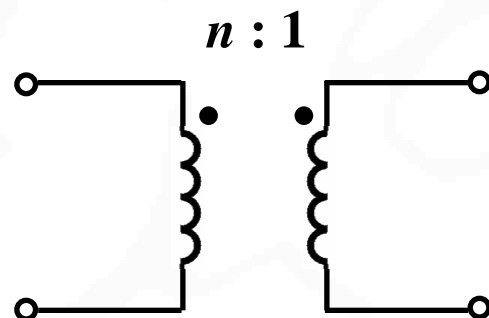
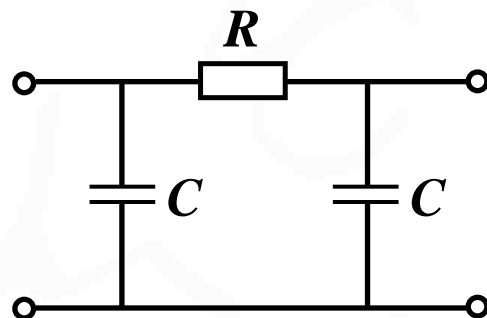
✧ **网络**：由若干个元器件组成的闭合电路。

✧ **n 端网络**：有 n 个端钮与外部电路相连的网络。

✧ 电阻、电容、电感和独立电源，都属于二端网络（常称为**一端口网络**），一端口网络分为无源和有源两种。

✧ 受控电源，有四个端钮与外部电路相连，称为**四端网络**。

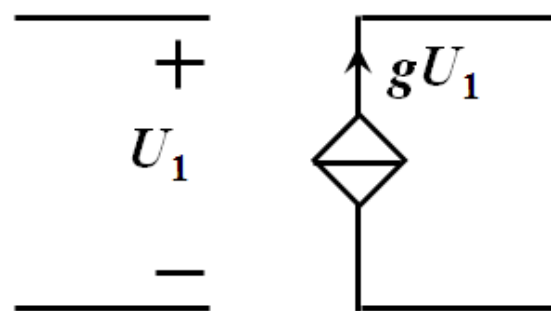
四端网络示例



➤ 双口网络

✧ 双口网络：流过四个端钮上的电流两两成对的四端网络（流入电流等于流出电流）。

✧ 例如受控源就是一个双口网络。

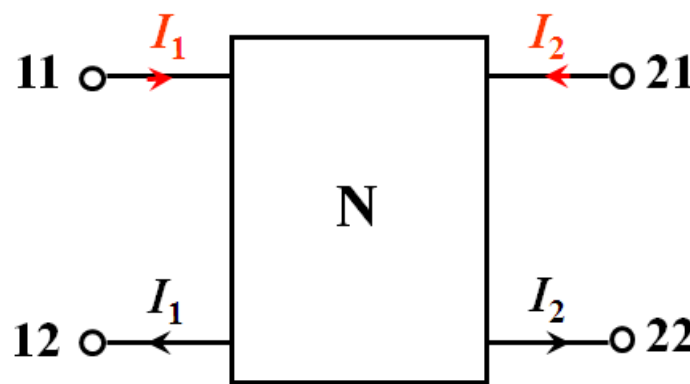


✧ 双口网络的框图表示：

通常A表示有源网络，

P表示无源网络，

N表示任意网络。





➤ 双口网络的参数表示

✧ 略。

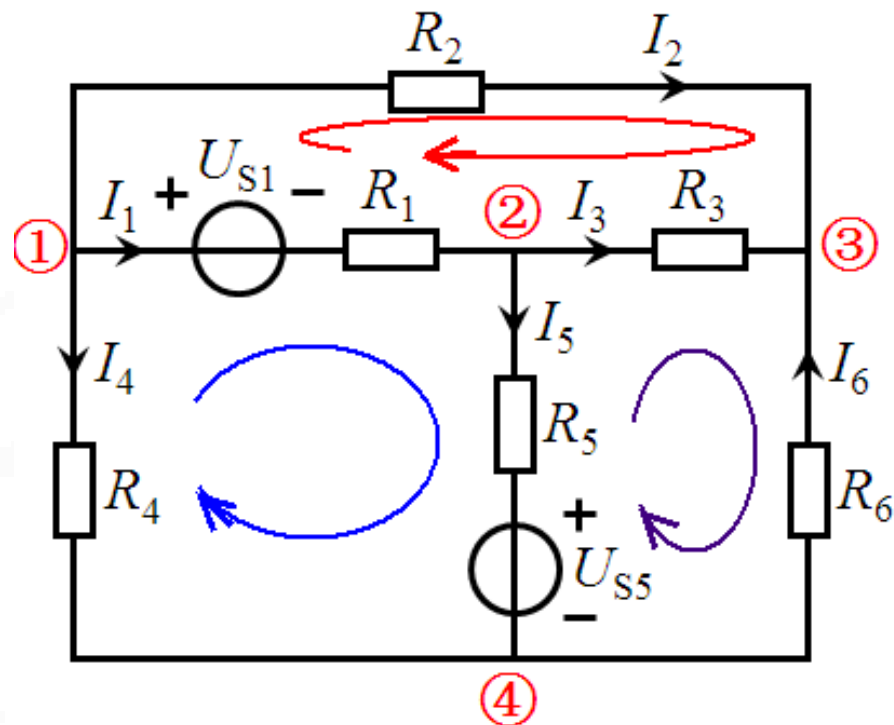
2.4 基尔霍夫定律与拓扑约束

一、电路的拓扑结构

- ✧ **支路**：单个或若干个二端元件所串联成的电路。
- ✧ **节点**：两条以上支路的交汇点。
- ✧ **回路**：若干条支路组成的闭合路径。

示例中：**6条支路** **4个节点** **3条回路**

注：该电路除上述3条回路外，还可选择多条不同的回路。



二、基尔霍夫定律

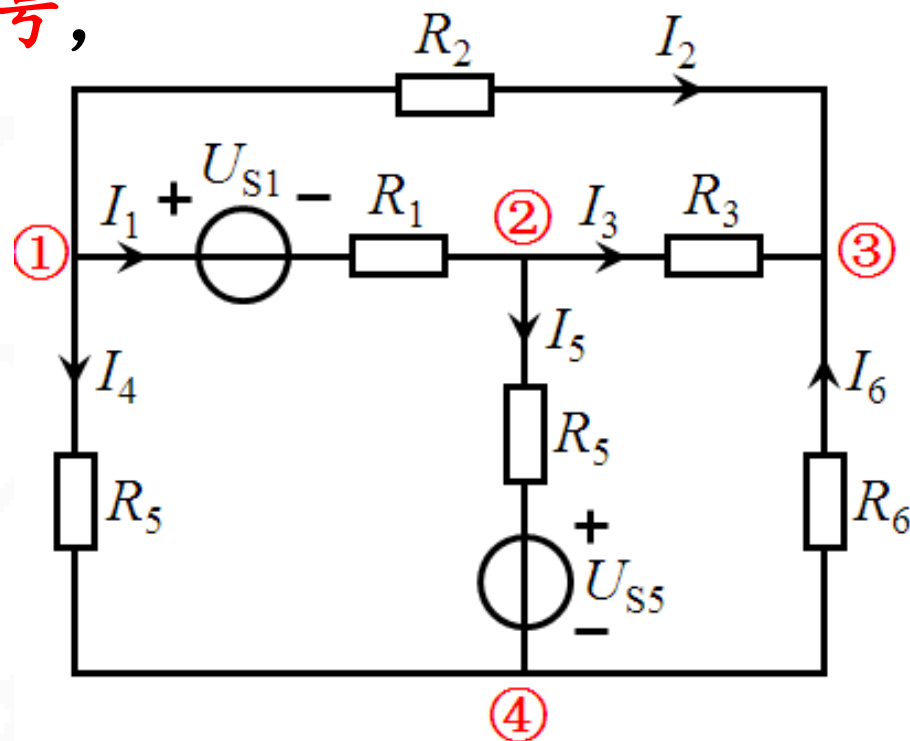
➤ KCL: Kirchhoff's Current Law 基尔霍夫电流定律

✧ 流过电路中任一节点电流的代数和为零。

$$\sum i = 0$$

其中流出节点的电流取正号，
流入节点的电流取负号。

- ✧ 节点①: $I_1 + I_2 + I_4 = 0$
节点②: $-I_1 + I_3 + I_5 = 0$
节点③: $-I_2 - I_3 - I_6 = 0$
节点④: $-I_4 - I_5 + I_6 = 0$

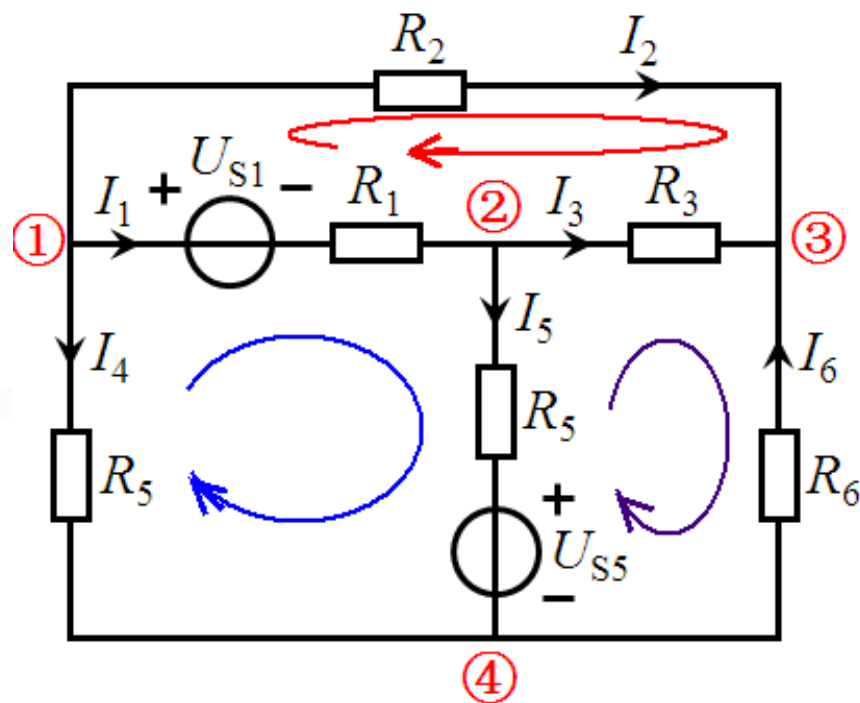


➤ KVL: Kirchhoff's Voltage Law 基尔霍夫电压定律

✧ 电路任一闭合回路中各支路电压（或元件电压）的代数和为零。

$$\sum u = 0$$

支路（元件）电压方向与回路绕行方向一致时取正号，相反时取负号。



✧ 先设定回路绕行方向（任意设定）、及各个支路电压参考方向。（注：图中支路电压方向取为与支路电流方向一致。）

✧ 第1种形式：按支路电压

回路1: $U_2 - U_3 - U_1 = 0$

回路2: $U_1 + U_5 - U_4 = 0$

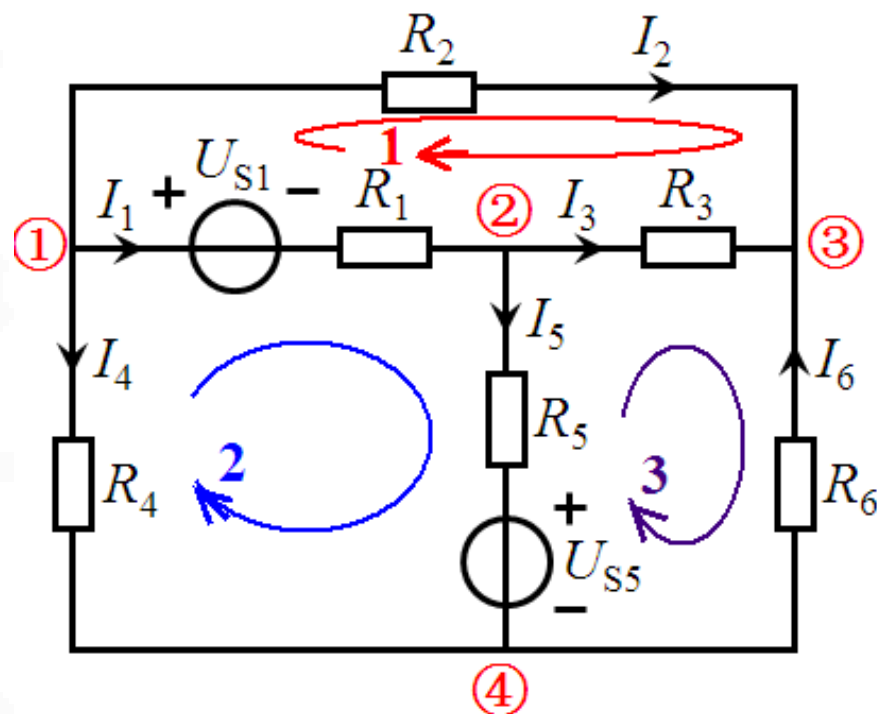
回路3: $U_3 - U_6 - U_5 = 0$

✧ 第2种形式：按元件电压

回路1: $I_2 R_2 - I_3 R_3 - I_1 R_1 - U_{S1} = 0$

回路2: $U_{S1} + I_1 R_1 + I_5 R_5 + U_{S5} - I_4 R_4 = 0$

回路3: $I_3 R_3 - I_6 R_6 - U_{S5} - I_5 R_5 = 0$



◇ 第3种形式:

电阻
电压降

$$\sum R \times I = \sum U_s$$

电源
电压升

电阻电压降: 电流方向与回路方向一致时取正号。

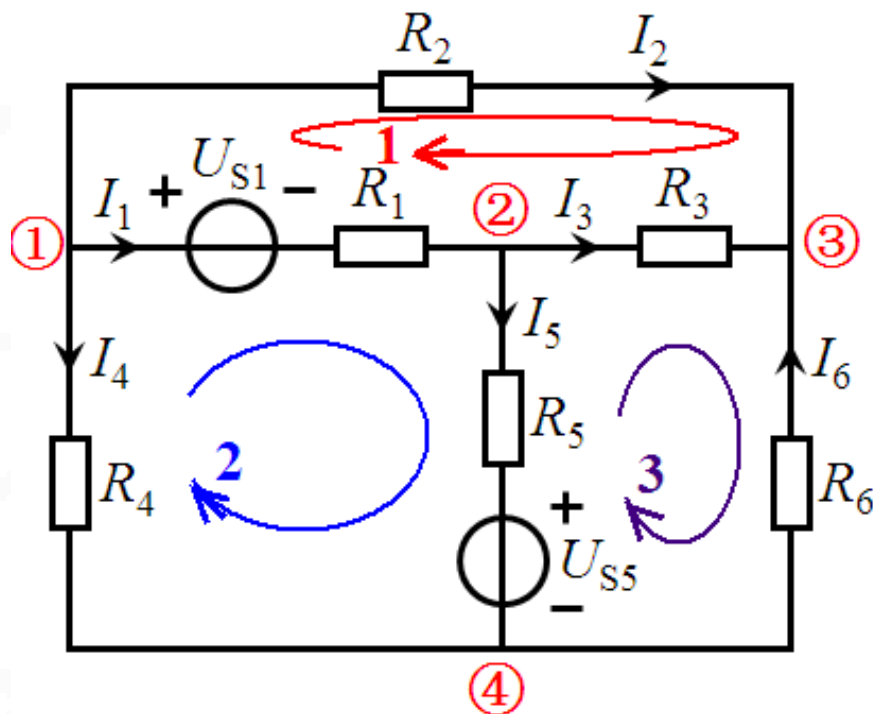
电源电压升: 电动势方向与回路方向一致时取正号;

(注: 电压源电动势方向与电压方向相反)。

回路1: $I_2 R_2 - I_3 R_3 - I_1 R_1 = U_{S1}$

回路2: $I_1 R_1 + I_5 R_5 - I_4 R_4 = -U_{S1} - U_{S5}$

回路3: $I_3 R_3 - I_6 R_6 - I_5 R_5 = U_{S5}$





✧ 第4种形式:

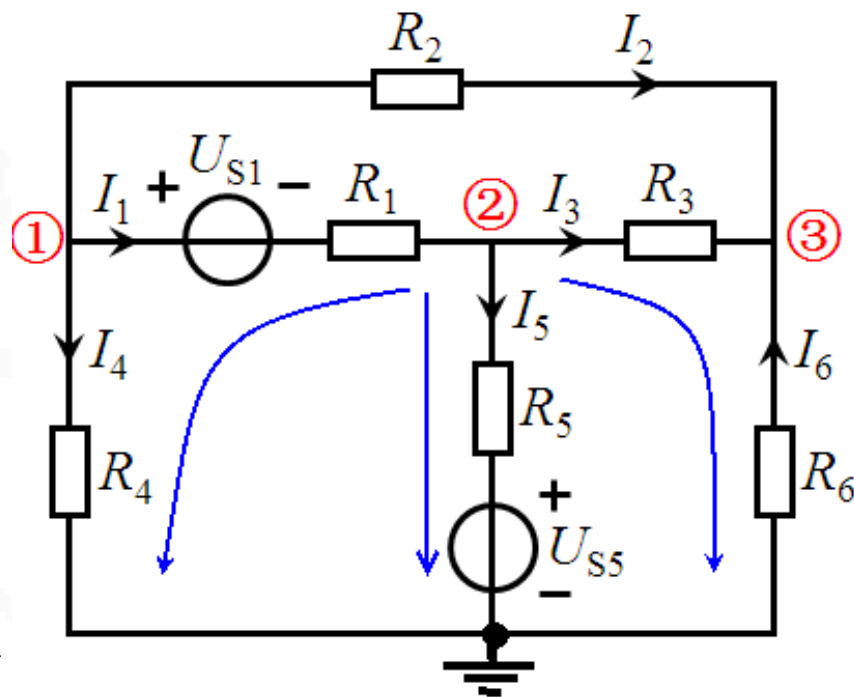
电路中任意两点间的电压等于两点间**任一条路径**经过的各元件电压的代数和。

节点②电压:

$$\begin{aligned}U_{②} &= I_5 R_5 + U_{S5} \\&= -I_1 R_1 - U_{S1} + I_4 R_4 \\&= I_3 R_3 - I_6 R_6\end{aligned}$$

支路1电压:

$$\begin{aligned}U_1 &= U_{①} - U_{②} = U_{S1} + I_1 R_1 \\&= I_4 R_4 - (I_5 R_5 + U_{S5}) \\&= I_2 R_2 - I_3 R_3\end{aligned}$$



【例1】

图示电路，已知 $U_{S1}=12\text{ V}$ ，
 $U_{S2}=6\text{ V}$ ， $R_1=R_2=3\ \Omega$ ， $R_3=6\ \Omega$ ，
求电流 I_3 和 I 。

【解】

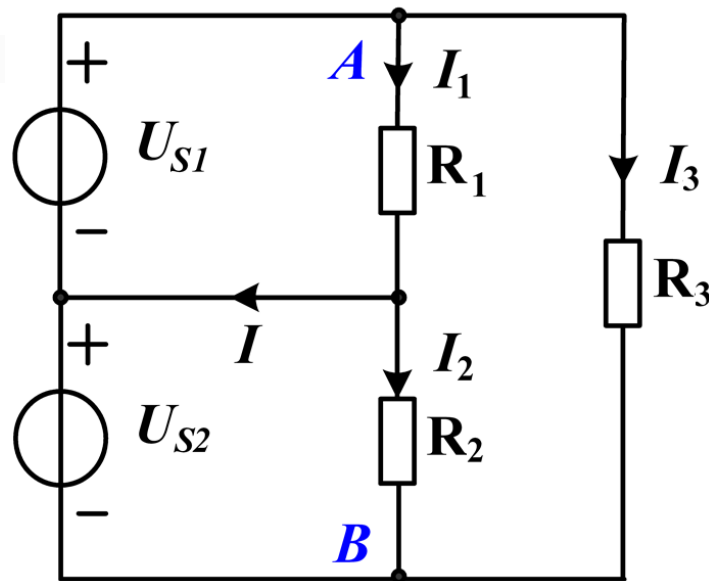
由KVL得： $R_3 I_3 = U_{S1} + U_{S2}$

$$I_3 = \frac{12+6}{6} = 3\text{ A}$$

由KVL得： $I_1 = \frac{U_{S1}}{R_1} = 4\text{ A}$

$$I_2 = \frac{U_{S2}}{R_2} = 2\text{ A}$$

由KCL得： $I = I_1 - I_2 = 2\text{ A}$



➤ 小结与讨论：电路中的两类约束

✧ 电路中电压电流的变化遵循两类约束条件。

✧ 第一类是受元件特性关系的约束，即元件的伏安特性：

$$u = iR \quad i_C = C \frac{du_C}{dt} \quad u_L = L \frac{di_L}{dt}$$

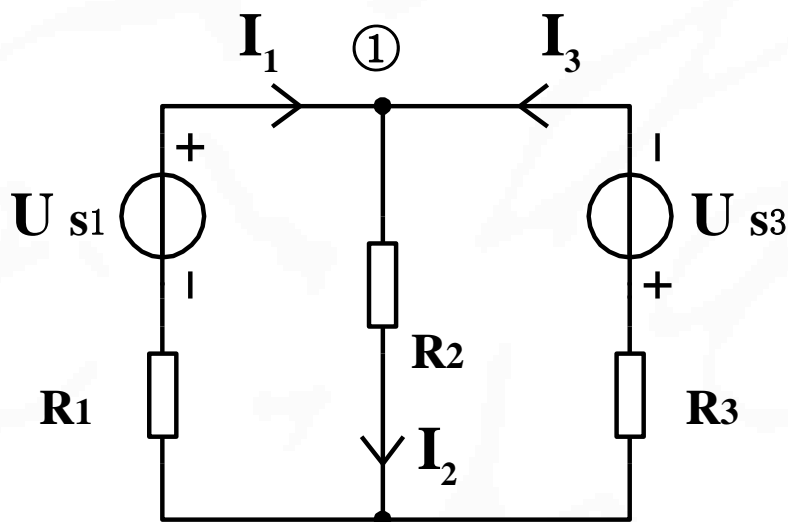
✧ 第二类是受元件连接关系的约束（拓扑约束），即基尔霍夫定律：

$$\sum i = 0 \quad \sum u = 0$$

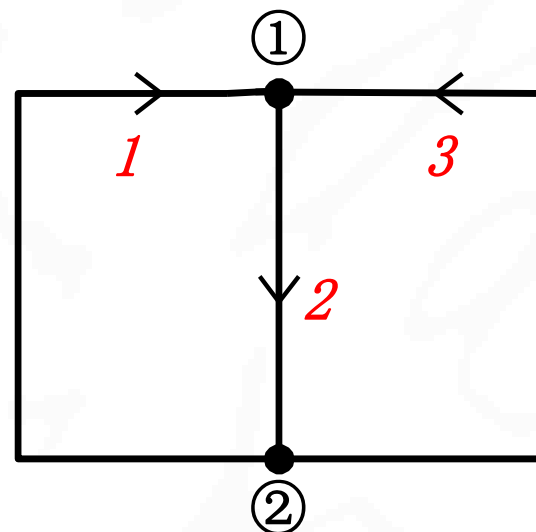
三、线性无关的KCL和KVL方程（拓扑图论基础）

➤ 图的概念

✧ **线图**：对于一个由**集中参数元件**组成的电网络，若用线段表示支路，用黑圆点表示节点，由此得到一个由线条和点所组成的图形，称此图为原电路的**拓扑图**，简称为**线图**或**图**。

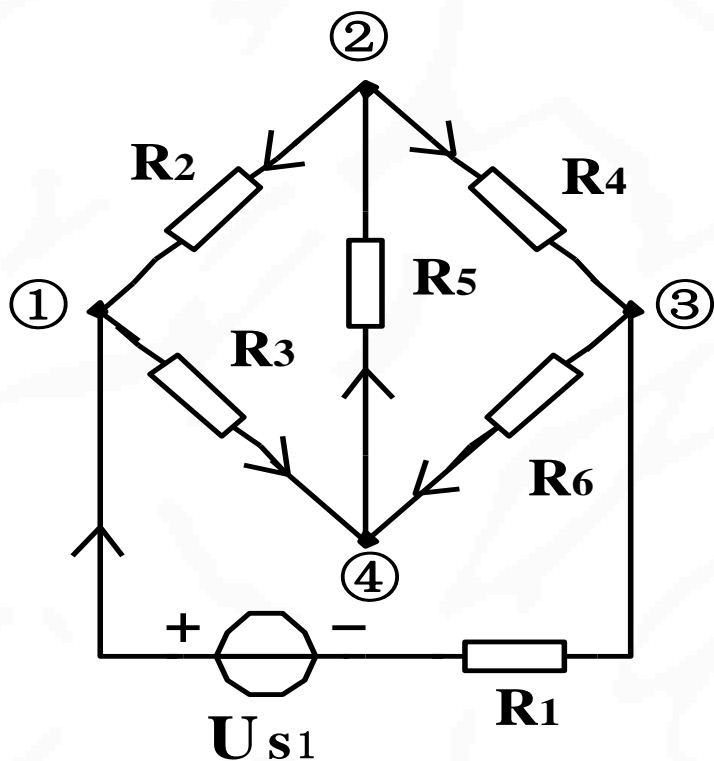


实际电路图 ②

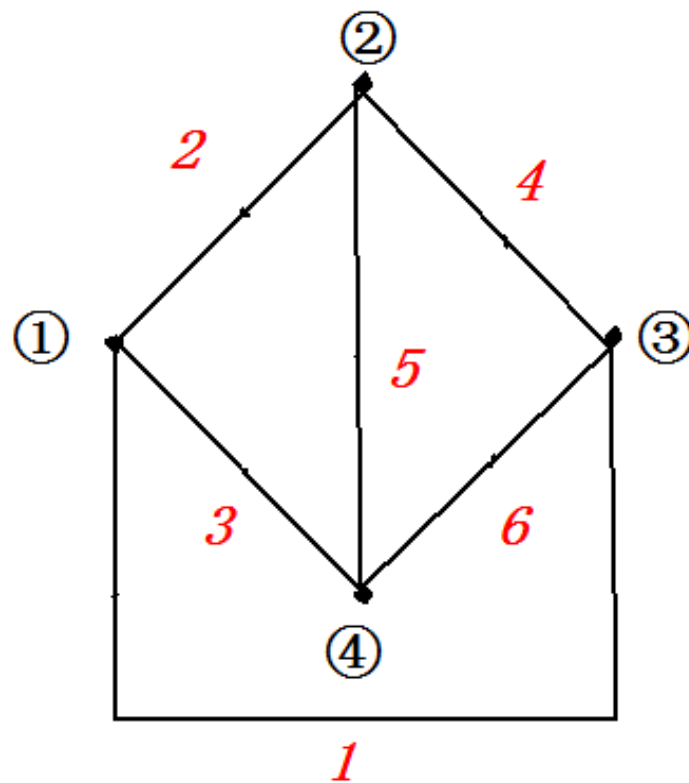


对应的线图

◇ **节点、支路**：线图反映了实际电路的结构（支路与节点之间的连接关系），由点（**节点**）和线段（**支路**）组成。



实际电路图



4个节点，6条支路

✧ **有向图**：如果线图各支路规定了一个方向（用箭头表示，一般取与电路图中支路电流方向一致），则称为有向图。

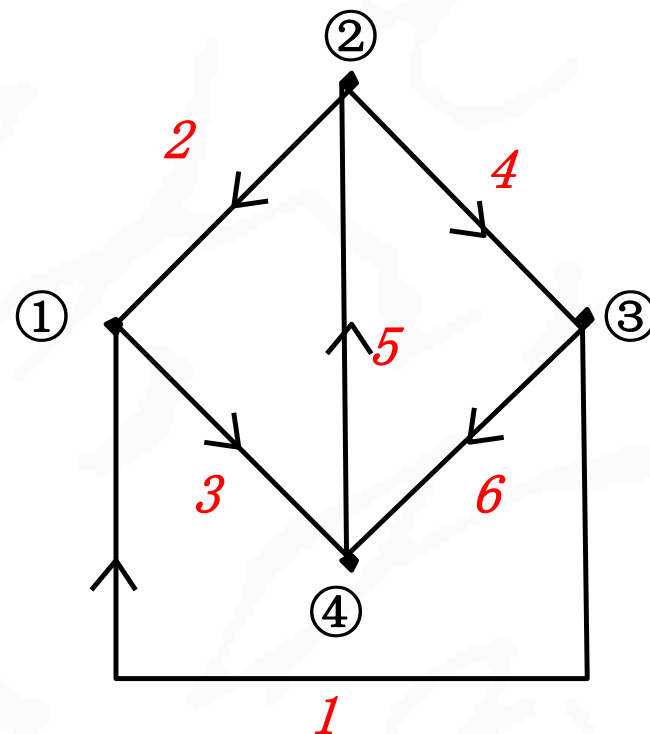
✧ **回路**：由若干支路组成的闭合通路。

✧ **网孔回路**：回路内无任何支路，则此回路称为网孔回路。

b 表示支路数(branch)

n 表示节点数(net)

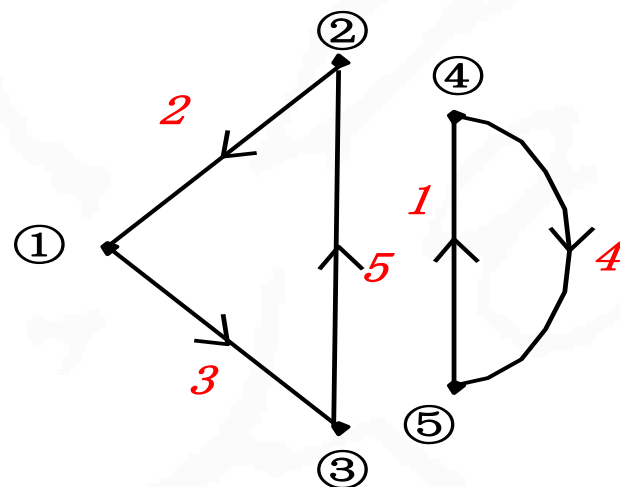
l 表示网孔数(loop)



$$l = b - n + 1$$

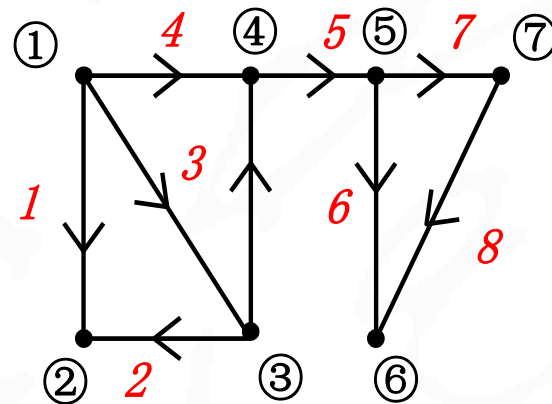
示例中： $b=6$ $n=4$ $l=3$

✧ **连通图**：当图的任意二个节点间至少存在一条通路时，称为**连通图**，否则为**非连通图**。



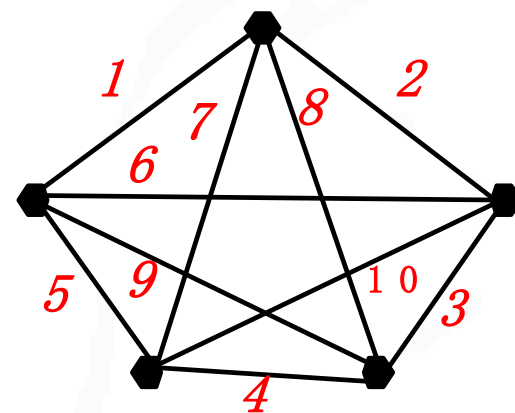
非连通图

✧ **不可分图**：连通图上任意二个节点之间至少存在一个回路，则称为**不可分图**，否则为**可分图**。



可分图

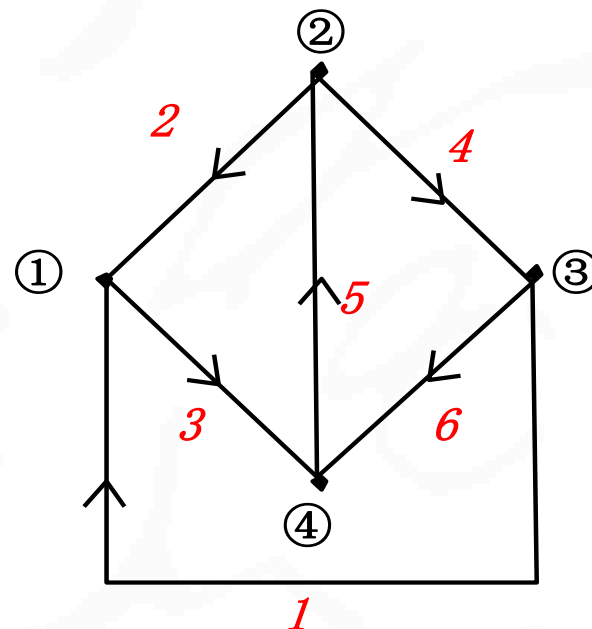
✧ **平面图**：如果图能无任何交叉地画在平面上，则称为**平面图**，否则为**非平面图**。



非平面图

✧ 对于连通不可分的平面图，其网孔数为：

$$l = b - n + 1$$



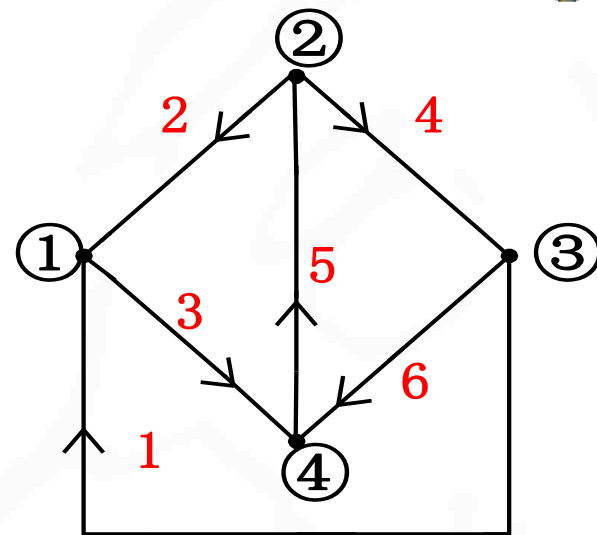
➤ 树的概念

✧ 树 T 是图 G 的一个子图，树包含所有节点与一些支路的集合。

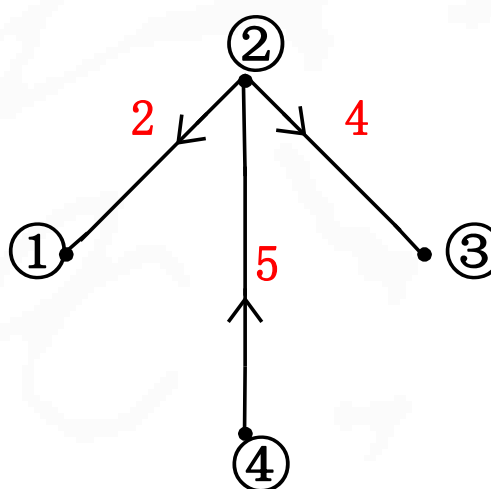
✧ 树 T 满足下面三个条件：

- 包含 G 的全部节点；
- 树是连通的；
- 不包含回路。

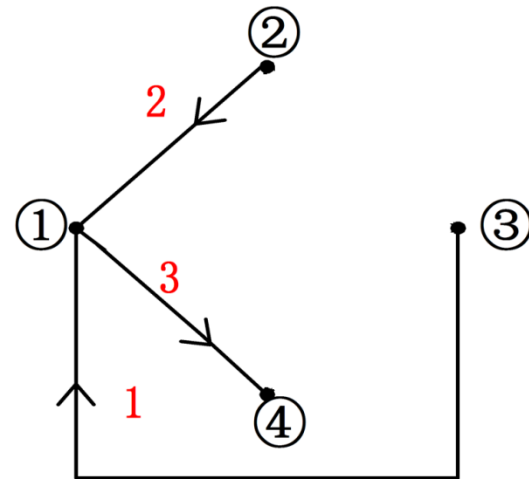
✧ 树的选择是不唯一的，一般可选出多个树。



有向图 G

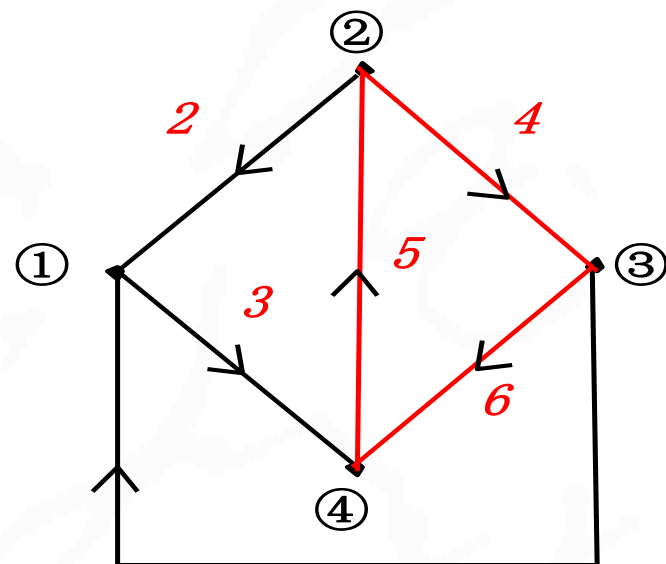


树 T_1



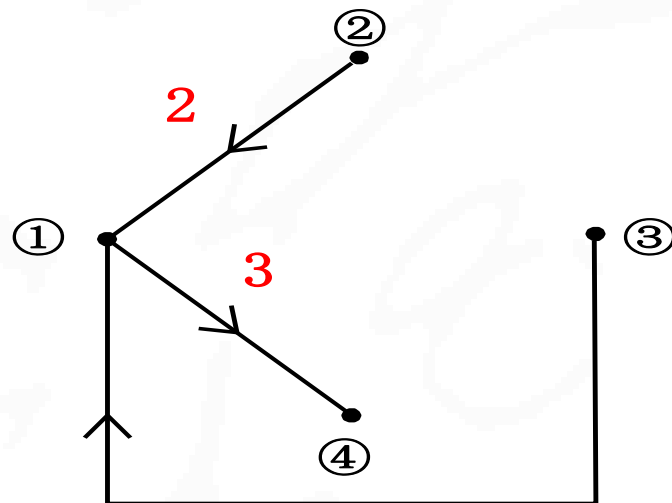
树 T_2

- ✧ **树枝**：树T所包含的支路称为树枝；（图中支路1、2、3）
- ✧ **连支**：图G中其余的支路称为连支；（图中支路4、5、6）



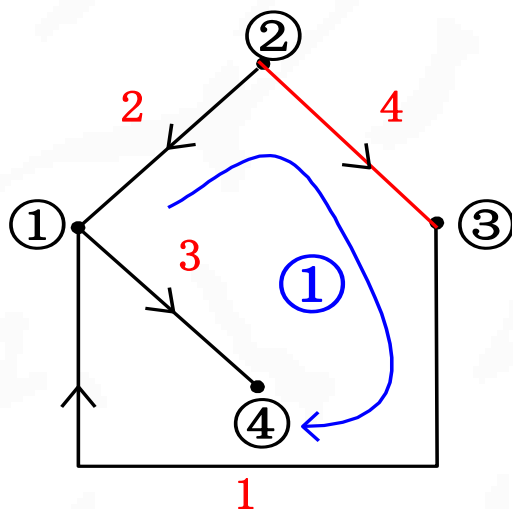
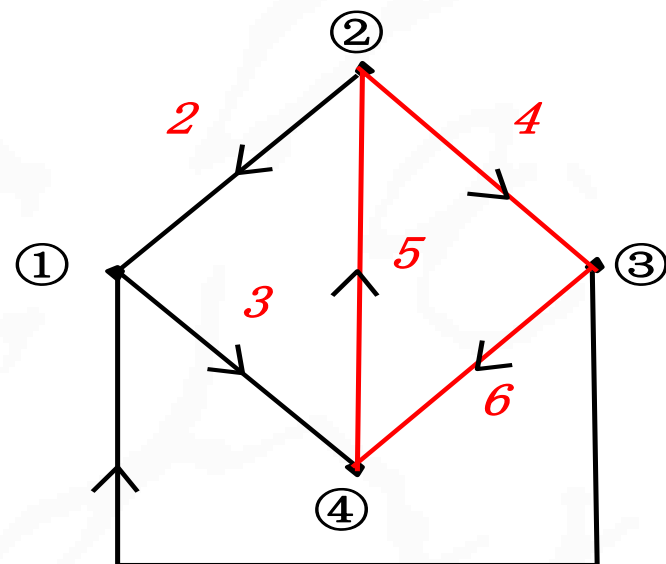
1 图G

- ✧ 树枝数 = $n - 1$ （节点数减1）
- ✧ 连支数 = 支路数 - 树枝数
 $= b - n + 1 = \text{网孔数}$

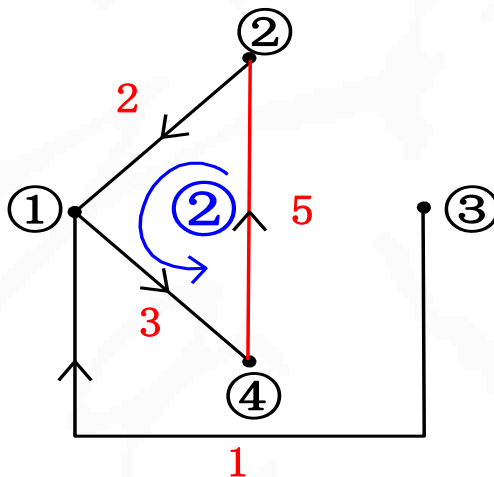


1 树T

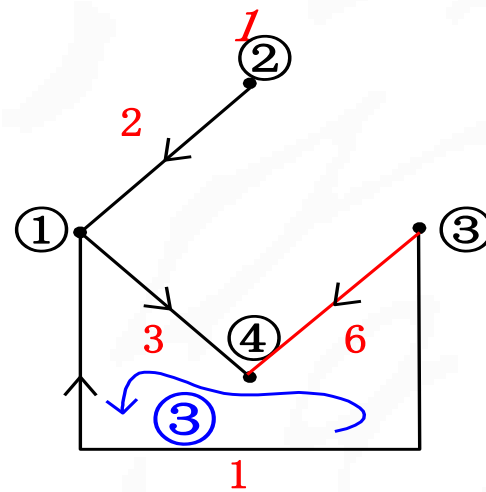
✧ **单连支回路**：由树的定义可知，每条连支与树必然构成一条回路，此回路称为单连支回路，也称为**基本回路**。基本回路是独立回路。



单连支回路1



单连支回路2

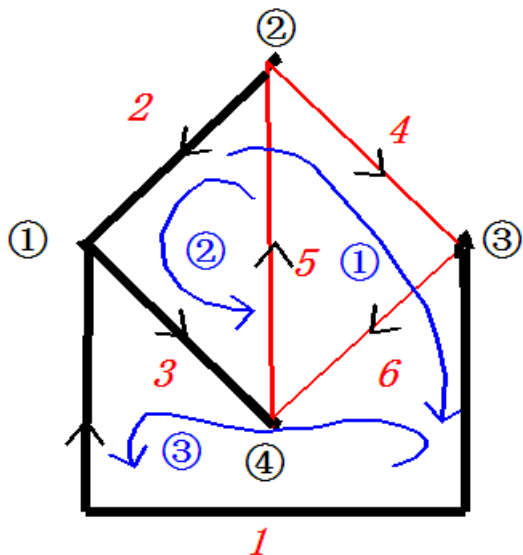


单连支回路3

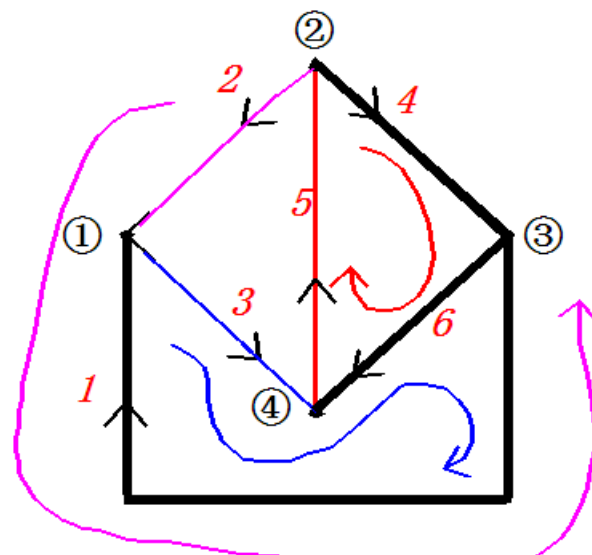
✧ 单连支回路的参考方向与连支的参考方向一致。

➤ 结论与讨论:

- ✧ 单连支回路是独立回路 ($b - n + 1$)，按**单连支回路**列写的**KVL方程相互独立的**。
- ✧ 单连支回路有多种选择，但选定了电路对应有向图的树，则单连支回路的路径和方向也唯一确定了。



选1、2、3为树



选1、4、6为树

- ✧ 已知连支电流，可解出各支路电流。



本章重点提示:

- ✧ 掌握电路基本元件的模型与特性（电阻、电容、电感；独立电压源、独立电流源）
- ✧ 掌握受控电源的符号及含义（VCVS、VCCS、CCVS、CCCS）
- ✧ 电路分析与计算必须先标出参考方向，会根据参考方向判别是发出功率还是吸收功率
- ✧ 深刻理解基尔霍夫定律，会熟练写出节点电流方程和回路电压方程
- ✧ 理解图论的基本概念，会确定单连支回路。



作业：

题2.2

题2.4

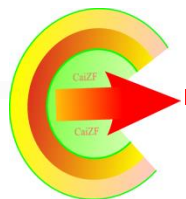
题2.5

题2.8

提示：题2.4数据不合理，解题时不需要考虑。书后答案有误，应为 $I_5=-3\text{A}$ 、 $I_6=-6\text{A}$ 。



Thank you for your attention



蔡忠法

Ver2.01

浙江大学电工电子教学中心

版权所有©

2019年